



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA NÁHRADNÍHO DÍLU CHLAZENÍ K ELEKTROMOTORU S VYUŽITÍM TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

PRODUCTION OF SPARE PART OF COOLING FROM ELECTROMOTOR  
WITH THE USE OF RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Martin Šula

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Martin Macků

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/12

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Šula

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Výroba náhradního dílu chlazení k elektromotoru s využitím technologie rapid prototyping**

v anglickém jazyce:

### **Production of spare part of cooling from electromotor with the use of rapid prototyping technology**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zhotovení 3D modelu ventilátoru a to podle poškozeného dílce. Pro vymodelování 3D modelu bude použit grafický program Autodesk Inventor. Pro výrobu master modelu bude použita technologie rapid prototyping (metoda FDM). Součástí práce bude výroba silikonové formy dílu pomocí vakuového lícího systému, odlití finálního kusu z vysokopevnostní polyuretanové pryskyřice a technicko-ekonomické zhodnocení výroby dílce.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši na dostupné metody rapid prototyping. Dále zhotovit pomocí rapid prototyping (metoda FDM) 3D model chlazení k elektromotoru, díky kterému bude zhotovena silikonová forma a následně finální odlitek z polyuretanové pryskyřice.



Seznam odborné literatury:

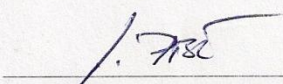
1. CHUA, C.-K., et al. Rapid Prototyping - Principles and Applications. 2nd ed. Singapore: Fulsland Offset Printing Pte, 2004. 411 p. ISBN 981-238-120-1.
2. JACOBSON, D.-M., RENNIE, A.-E., BOCKING C.-E. Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. London: Professional Engineering Publishing, 2004. 112 p. ISBN 1860584659.
3. PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In: Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Slovensko, 2004. ISBN 80-227-2121-2.

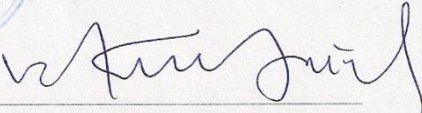
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Macků

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 31.10.2011



  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na výrobu poškozeného dílu chlazení. Poškozený díl ventilátoru byl vymodelován v programu Autodesk Inventor, převeden do výstupního formátu a následně pomocí technologie Rapid Prototyping vytisknut s využitím aditivní metody Fused Deposition Modelling. Součástí práce je výroba silikonové formy, pomocí které byl odlit ventilátor chlazení elektromotoru. Závěrem práce je ekonomické zhodnocení výroby deseti kusů.

### Klíčová slova

CAD, Rapid Prototyping, Master model, Fused Desposition Modelling.

## ABSTRACT

This work is focused on making the damaged part cooling. Damage to the fan part was modeled in Autodesk Inventor, converted to the output format, and then use technology Rapid Prototyping printed using additive methods Fused Deposition Modelling. The work is the production of silicone molds, which was cast using the cooling fan motor. Finally, work is an economic evaluation of production of ten pieces.

### Keywords

CAD, Rapid Prototyping, Master model, Fused Desposition Modelling.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠULA, M. *Výroba náhradního dílu chlazení k elektromotoru s využitím technologie rapid prototyping*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Macků.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba náhradního dílu chlazení k elektromotoru s využitím technologie rapid prototyping** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

  
Datum

---

  
Martin Šula

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Martinu Macků za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

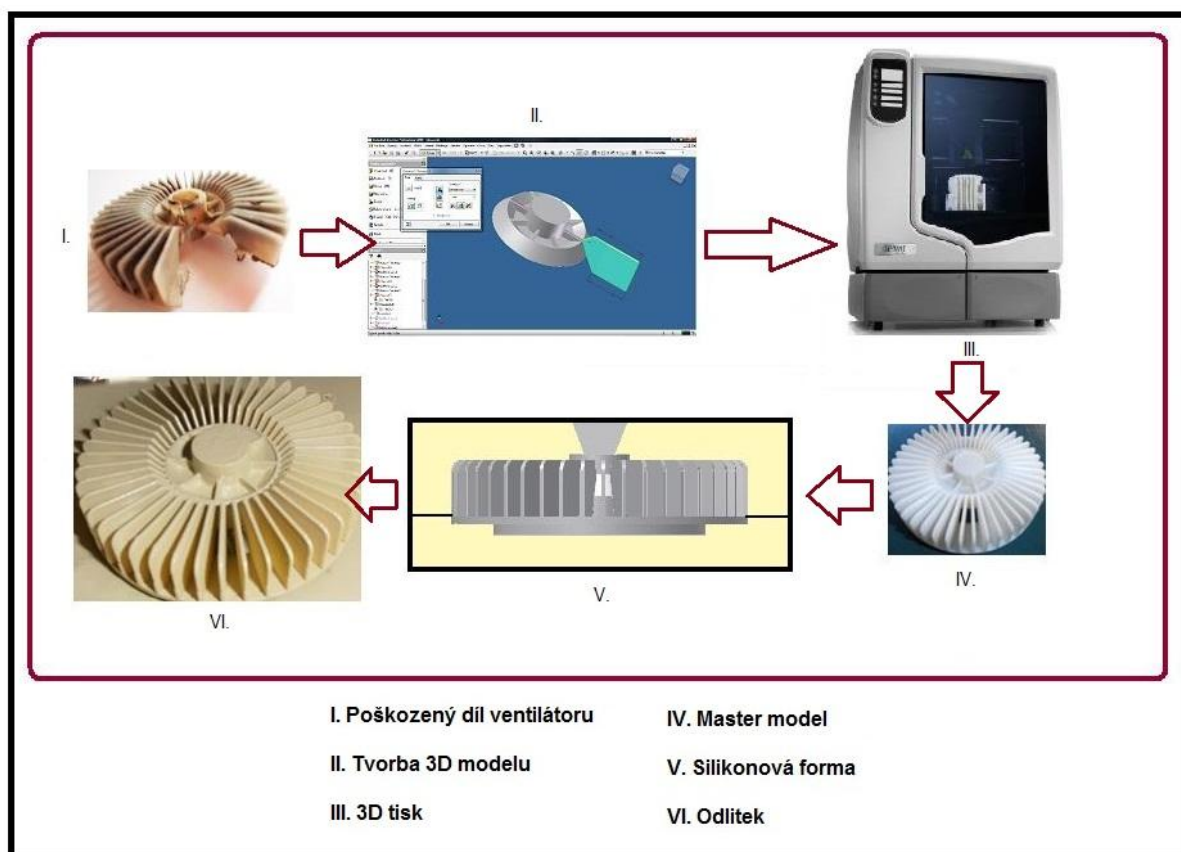
## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD .....	8
1 HISTORIE A VÝVOJ CAD SYSTÉMŮ .....	9
1.1 CAD SYSTÉMY .....	9
1.2 HLAVNÍ ZÁSTUPCI CAD SYSTÉMŮ .....	10
1.3 AUTOCAD .....	11
1.3.1 POPIS PROGRAMU .....	12
1.4 INVENTOR .....	12
1.4.1 PROSTŘEDNÍ PROGRAMU .....	12
1.4.2 POPIS PROGRAMU: .....	14
2 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING .....	15
2.1 SLA-STEREOLITOGRAFIE .....	15
2.2 SGC – SOLID GROUND CUTTING .....	16
2.3 SLS – SELECTIVE LASER SINTERING .....	17
2.4 DMLS – DIRECT METAL LASER SINTERING .....	18
2.5 LOM – LAMINATED OBJECT MANUFACTURING .....	19
2.6 FDM – FUSED DEPOSITION MODELLING .....	20
2.7 MJM – MULTI JET MODELLING .....	21
2.8 VÝHODY A NEVÝHODY METOD RP .....	21
3 PRAKTICKÁ ČÁST .....	23
3.1 VÝROBA MODELU .....	23
3.2 PŘEVOD 3D MODELU DO FORMÁTU PRO 3D TISKÁRNU .....	23
3.3 NAČTENÍ PROGRAMU CATALYSTEX .....	24
3.4 TISK 3D MODELU .....	26
3.5 PŘÍPRAVA MASTER MODELU PRO TVORBU FORMY .....	27
3.6 VÝROBA SILIKONOVÉ FORMY .....	27
3.6.1 VÝROBA HORNÍ ČÁST FORMY .....	28
3.6.2 VÝROBA SPODNÍ ČÁSTI FORMY .....	30
3.7 ODLITÍ VENTILÁTORU .....	31
4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	33
ZÁVĚR .....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	36

## ÚVOD

Cílem této bakalářské práce bude vyrobit poškozený díl chlazení elektromotoru, jedná se o ventilátor chlazení. Bude vyráběn za pomoci metody Rapid Prototyping (rychlá tvorba prototypů), která je moderní a hojně využívaná technologie při stavbě modelů a prototypů budoucích výrobků. Metoda vyniká svojí přesností, rychlostí a dostupností.

Nejdříve bude kladen důraz na popsání CAD softwaru, poté metody Rapid Prototyping. Metody budou srovnány včetně jejich výhod a nevýhod. Master model ventilátoru bude zhotoven technologií FDM - Fused Deposition Modeling (nánosové vrstvení materiálu), tisknut na tiskárně uPrint od firmy Stratatys. Součástí práce bude praktická část, kde bude vyrobena silikonová forma, do které bude odlita vysoce-pevnostní pryskyřice, přičemž vznikne odlitek ventilátoru (Obr. 1.1).



Obr. 1.1. Postup výroby náhradního dílu

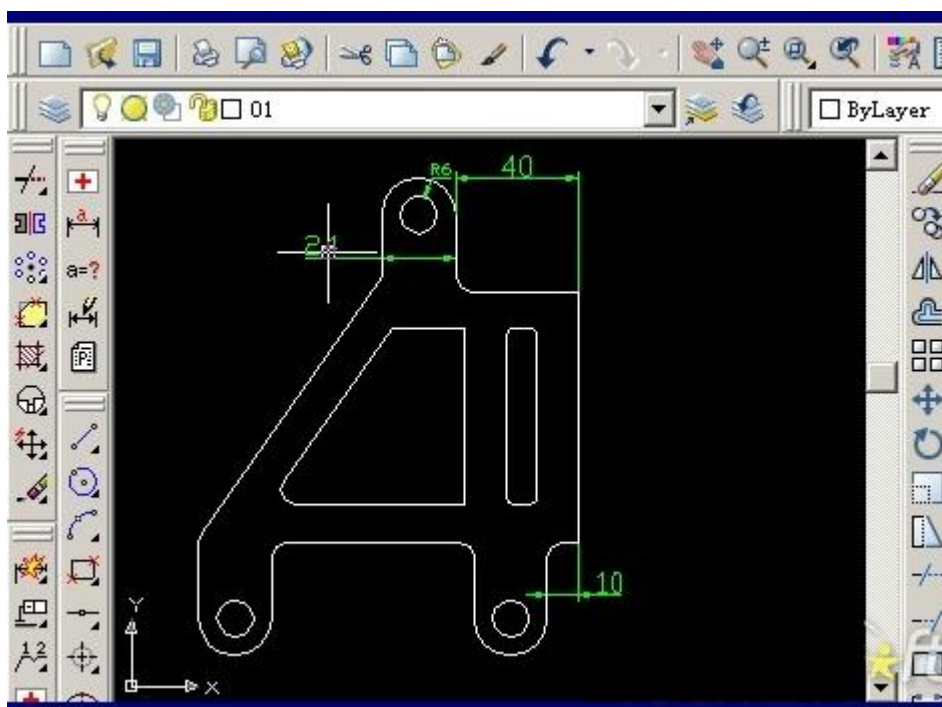


## 1 HISTORIE A VÝVOJ CAD SYSTÉMŮ

Vývoj informační technologie měl za následek i rozvoj CAD (Computer Aided Design) systémů, který lze volně přeložit jako počítačová podpora v oblasti konstruování. Na počátku vývoje CAD systémů stály světové automobilové a letecké společnosti. Na konci roku 1969 v automobilovém průmyslu to byly firmy: Ford, General Motors, Mercedes-Benz, Nissan, Toyota. Z leteckých společností: Lockheed, McDonnell-Douglas a Northrop. Při této snaze vývojové týmy často spolupracovaly s univerzitami [1].

První CAD programy pracovaly pouze ve 2D prostředí (obr. 1.2), ve své nejjednodušší podstatě lze CAD systém považovat za plnohodnotnou náhradu rýsovacího prkna, přičemž software umožňuje upravovat již narýsované čáry, u rýsovacího prkna tato možnost nepřicházela v úvahu [2].

Současné CAD systémy pracují na běžných stolních počítačích, bude-li výkonnější počítač po hardwarové stránce, tím rychleji bude systém pracovat, obzvláště při pevnostních výpočtech či různých simulacích. 3D programy umožní, vidět konstruktérovi simulaci na svém monitoru, vidí, jak jednotlivé součástky do sebe zapadnou a jestli nikde nenastane kolize.



Obr. 1.2. První AutoCAD [3]

### 1.1 CAD SYSTÉMY

CAD systému se využívají v prvotních etapách výrobního procesu, ve vývoji, v konstrukci a technologické přípravě výroby. Oblast CAD programů je jedna z mála, obecně jsou to CA technologie, tyto technologie znamenají účelné a maximální využití výpočetní techniky. Z tohoto důvodu jsou klimatizovaná pracoviště pro konstruktéry.

CAD systémy jsou nástroje, a tak na ně musí být i nahlíženo. Konstruktérem se člověk stává dlouholetou praxí a získáním praktických zkušeností.

CAD systémy prošly různými vývojovými etapami:

- sálové počítače, dovolovaly vytvářet dvourozměrnou výkresovou dokumentaci,
- pracovní stanice, umožňovaly vykreslit na vektorové obrazce trojrozměrné obrazce,
- vytváření výkresové dokumentace, nástupem výpočetní techniky,
- 3D modelování, převod modelů do výkresové dokumentace, vizualizace a animace, vlivem zvýšení výkonu počítače.

**CAD technologii lze dále rozdělit na jednotlivé oblasti, například takto:**

- CADD – Computer Aided Design and Drafting (počítačová podpora v oblasti kreslení a konstruování),
- CAPD – Computer Aided Pipe Design (počítačová podpora konstruování potrubí),
- CAE – Computer Aided Engineering (počítačová podpora projektování),
- GIS – Geographical Information System (geografický informační systém),
- CAM – Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora výroby).

### **Rozdělení CAD systémů**

CAD systémy je možné rozdělit do **tří kategorií**:

- I. nižší,
- II. střední,
- III. velké.

K zástupcům CAD systémů nižší třídy je možné zařadit takové systémy jako je AutoCAD LT, TurboCAD Deluxe, jedná se o systémy, které podporují tvorbu dvojrozměrných objektů (modelů) a umožňují generování výkresové dokumentace. Některé systémy umožňují vytvoření jednoduché trojrozměrné konstrukce pomocí drátového modeláře.

CAD systémy střední třídy mohou být zastoupeny programy AutoCAD, Microstation, TurboCAD Professional, CADKEY. Všechny tyto systémy obsahují trojrozměrné modelovací nástroje včetně nástrojů vizualizačních. Jsou vhodné pro tvorbu výkresové dokumentace a vytváření podkladů pro marketingové oddělení v podobě trojrozměrného zobrazení hotového výrobku.

Velké CAD systémy jsou plně trojrozměrné systémy, které pro vytvoření výkresové dokumentace vyžadují nejprve vytvoření trojrozměrného modelu, následně se vytvářejí sestavy nebo výkresové dokumentace. Jejich výhodou spočívá v tom, že mají parametrické modeláře. Pro uživatele to znamená to, že je neustále provázán model s výkresem a případné změny provedené v libovolné části se projeví jak ve výkrese, tak v modelu [2,4].

### **1.2 HLAVNÍ ZÁSTUPCI CAD SYSTÉMŮ**

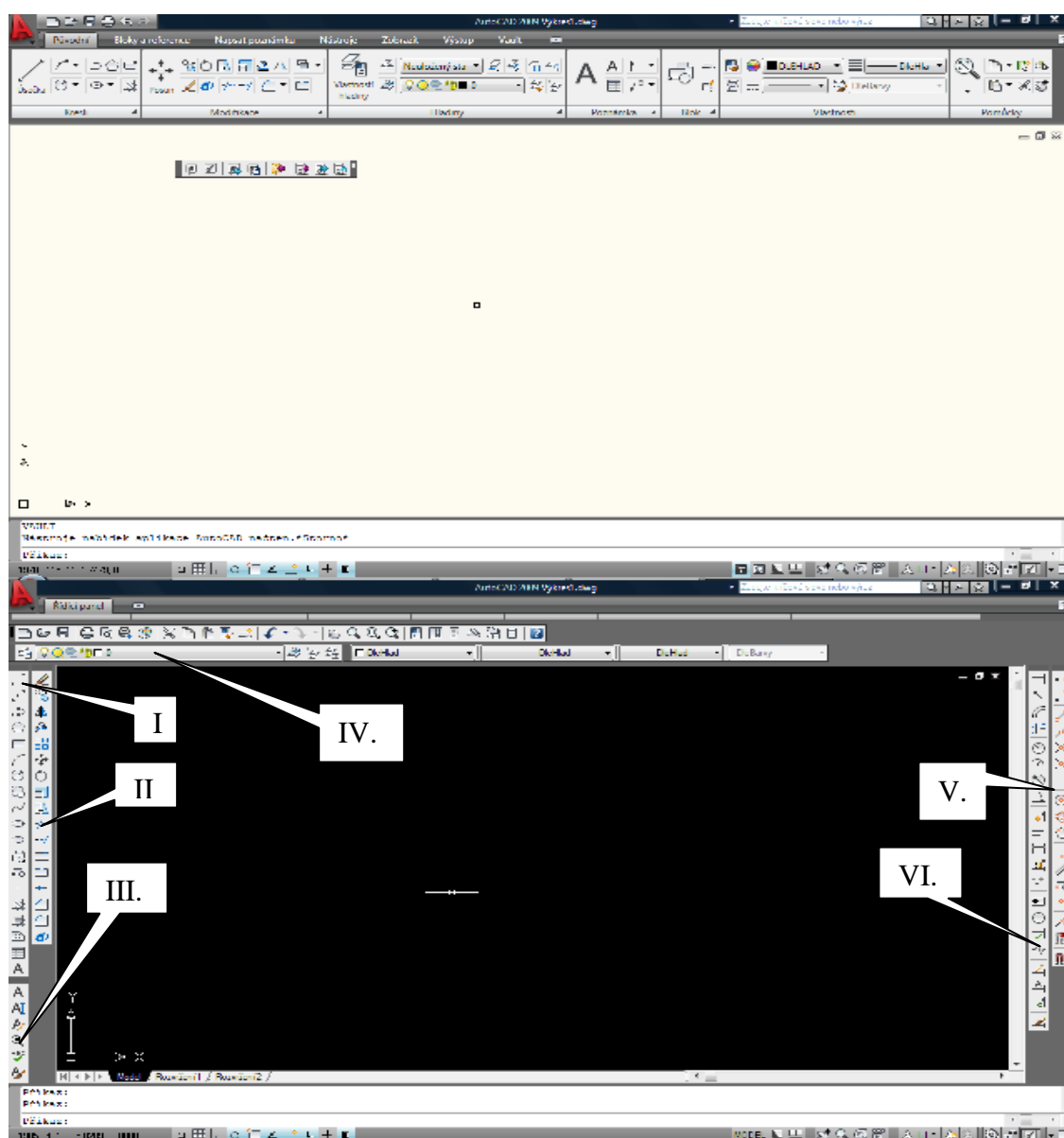
Mezi nejznámější 2D CAD systémy bezesporu patří produkt od firmy Autodesk, který nese název AutoCAD. V dnešní době ústupu 2D systému si drží významnou pozici na trhu, možná je to tím, že mnoho lidí si pod pojmem CAD představí právě AutoCAD. Další program od této firmy nazván Inventor, je to parametrický 3D modelář.

**CAD systémy pracují:**

- parametricky,
- neparametricky,
- synchronně.

**1.3 AUTOCAD**

Program AutoCAD je využíván při tvorbě výkresové dokumentace, tedy převážně pro 2D kreslení, přičemž otevřením jednoho panelu navíc lze v tomto programu modelovat, tedy vytvářet 3D modely, provádět vizualizace. AutoCAD je po uživatelské stránce jednoduchý program, který pracuje se stromovou strukturou a umožní přizpůsobení jednotlivým uživatelům (obr. 1.3).



Obr. 1.3. Autodesk AutoCAD 2009

### 1.3.1 POPIS PROGRAMU

Z předchozího obrázku je patrné, že program byl přizpůsoben jednotlivými panely nástrojů vyneseny na okraj pracovního pole, nyní budou jednotlivé panely nástrojů dle obrázku 1.3 popsány:

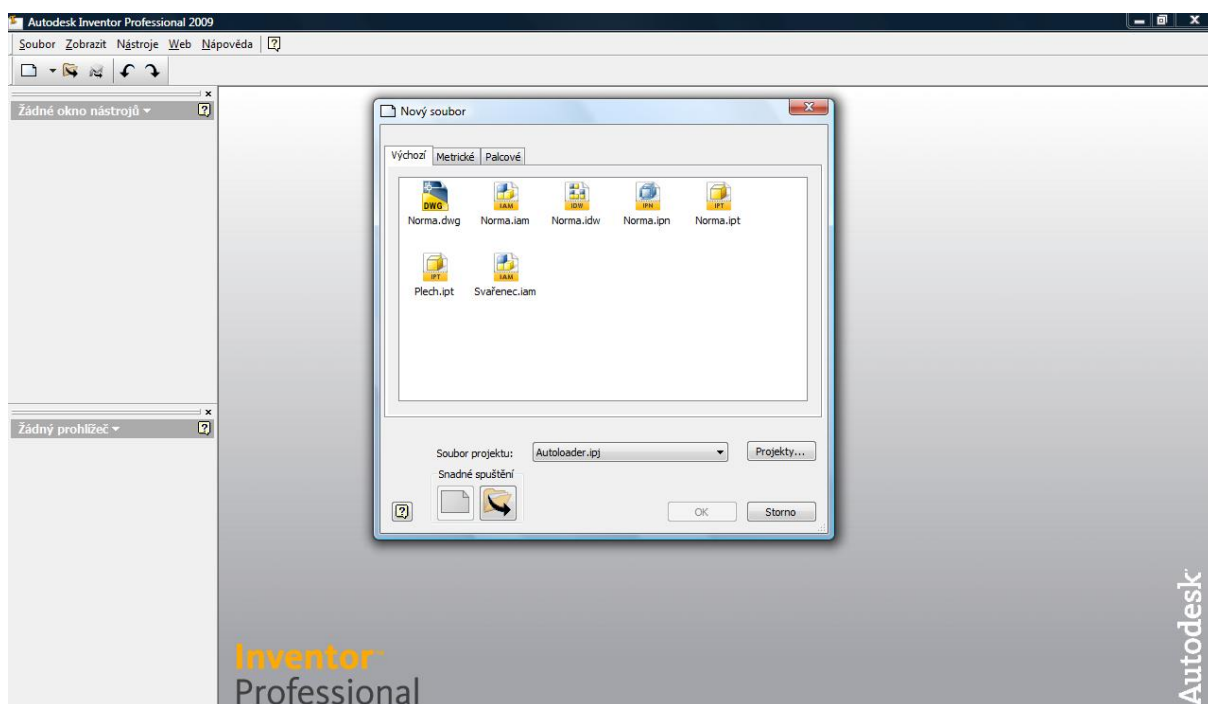
- I.  
Panel kreslit, je poskládán, tak, aby usnadnil konstruktérovi práci, první položka kreslicí čáry, následuje kružnice, mnohoúhelníky a šrafy.
- II.  
Panel modifikace, nachází se napravo od předchozího panelu, umožňuje modifikovat (měnit) objekty. Používá se především pro zrcadlení, kopírování, posouvání, spojování a ořezávání objektů.
- III.  
Panel text, poslední panel na levé straně, jeho název je text. Pomocí tohoto panelu se vytváří textová pole, edituje se text.
- IV.  
Na pravé straně, nejbližší k pracovní ploše panel s názvem kóta. Tento panel umožňuje kótovat potřebné rozměry, včetně geometrických odchylek.
- V.  
Napravo od kótovacího panelu se nachází panel uchopení objektu. Panel umožňuje snadnější práci s kótami, uchycení nebo výběr referenčního bodu, či připojování dalších čar.
- VI.  
Panel hladiny, zde se nachází výběr rýsovací čáry v potřebné tloušťce, aby byl výkres přehlednější, jsou možné editace, včetně barvy.

### 1.4 INVENTOR

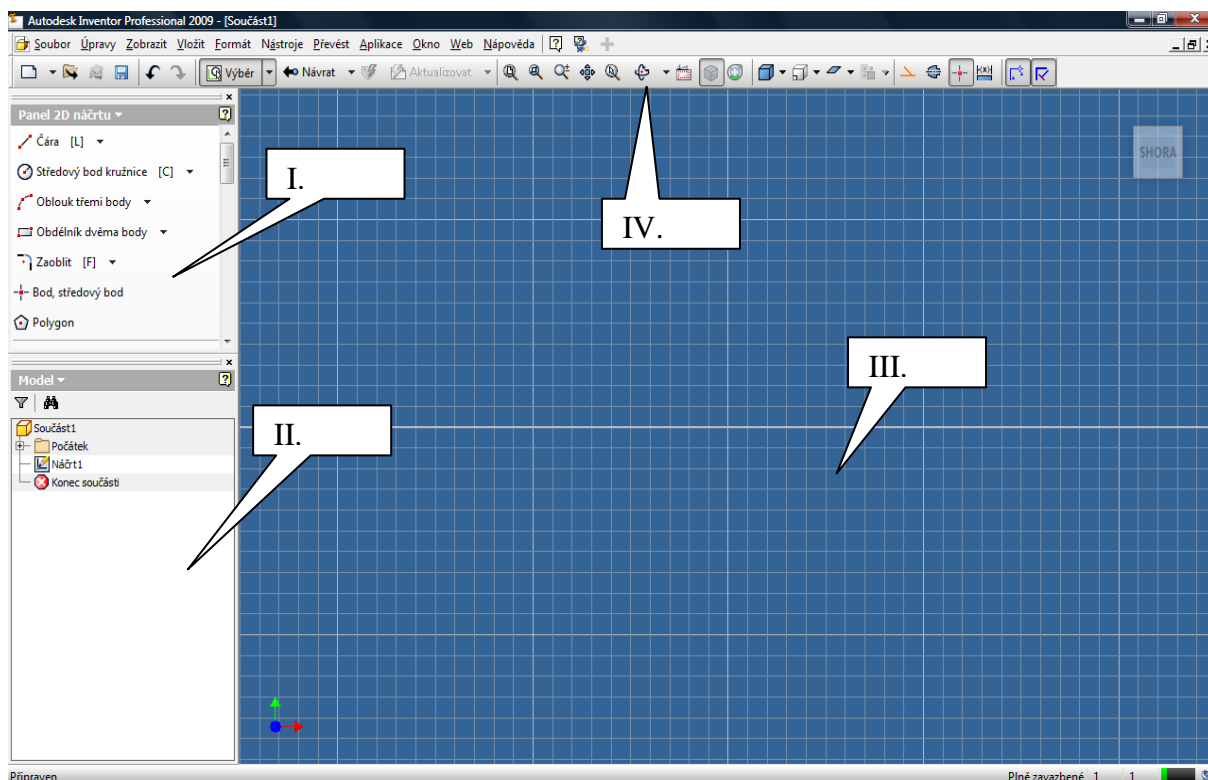
Program od firmy Autodesk s názvem Inventor je parametrický modelář s Ansys analýzou. Základ ve vytvoření modelu spočívá ve 2D náčrtech, které se následně zakótují. Po tomhle kroku následuje ukončení náčrtu, pokud zčernal, znamená to, že daný 2D náčrt je připraven pro vytvoření 3D objemového modelu, který se vytváří základními funkcemi (vysunutí, rotace, tažení), dále mohou následovat drobné úpravy, zkosení, zaoblení, sražení hran. Je vytvořen 3D model, z kterého program umí vytvořit výkresovou dokumentaci, která se následně zakótuje nebo zedituje. Další možnost využití 3D modelu pro pevnostní analýzu, vizualizaci. Převodem 3D modelu do formátu pro 3D tiskárnu je možné použít model pro aditivní metodu, kterou je Rapid Prototyping.

#### 1.4.1 PROSTŘEDNÍ PROGRAMU

Při spuštění programu je na výběr pracovat s normou.ipt (pro modelování různých součástí), normou plech.ipt (pro tvorbu plechových modelů), dále je na výběr: norma.iam nebo norma.ipn nebo svařenec.ipn (pro tvorbu sestav), norma.dwg (pro tvorbu výkresů použitelných v AutoCADu). Následně se zobrazí program v pracovním prostředí 2D náčrtu (Obr. 1.4).



Obr. 1.4. Autodesk Inventor 2009 – úvodní obrazovka



Obr. 1.5. Autodesk Inventor 2009



**1.4.2 POPIS PROGRAMU:**

Na obrázku 1.5 se program nachází ve 2D náčrtu, ten bude i popsán, je vidět, že je uzpůsoben ke snadnému vytvoření náčrtu. Na levé straně se nachází potřebné věci k vytvoření čar, kružnice, oblouku či různých nástrojů. Modrá část tvoří pracovní tedy modelovací plocha.

- I. Panel 2D náčrtu obsahuje základní kreslicí prvky: čára, kružnice, obdélník, polygon. Další funkce slouží k zrcadlení, obdélníkové či kruhové pole a obecnou kótu, tvorbu pracovních hladin.
- II. Panel modelu, jedná se o stromovou strukturu vytvářené součásti, popřípadě sestavy. Je zde vidět jak byl model tvořený, a lze kdykoliv editovat určitou část postupu při modelování dané součástky.
- III. Modelovací (kreslicí) plocha, zde vzniká náčrt součásti, následně model, se kterým se dále pracuje. Nachází se zde i krychlička pro snadnější pohyb po rovinách modelování.
- IV. Panel s pohledy, zvětšení nebo oddálení pracovní plochy, 3D orbit, dále se zde nachází rychlý panel pro uložení, otevření souboru. V poslední řadě tři ikony pro volbu konstrukční, osové čáry.

## 2 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping, dále jen RP je automatická výstavba fyzikálních modelů, jedná se o aditivní výrobní technologii. První techniky pro RP se objevily v roce 1980 a byly využity k výrobě modelů a prototypových dílů. Dnes jsou tyto technologie používány pro mnohem širší spektrum aplikací [4].

### Metody RP:

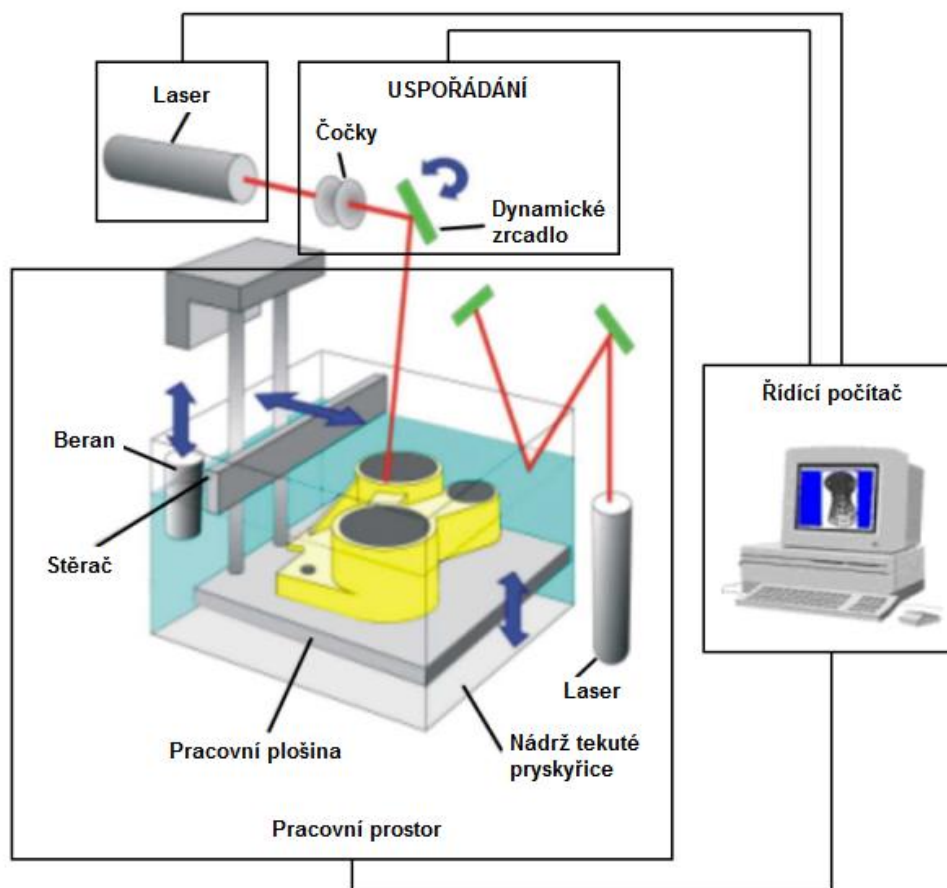
- SLA,
- SGC,
- SLS,
- DMLS,
- LOM,
- FDM,
- MJM.

### 2.1 SLA-STEREOLITOGRAFIE

Stavba SLA modelu je založena na postupném vytvrzování jednotlivých 2D vrstev, tyto vrstvy jsou získávány z obslužného softwaru v rámci přípravy modelu. Vrstvy jsou silné 0,05 až 0,15 mm, o tuto hodnotu je po každém vytvrzení snížena hodnota nosné desky. Po vytvrzení jedné vrstvy stírací čepel zároveň nanese pryskyřici na požadovanou tloušťku a celý proces se opakuje do vzniku součásti. Princip metody je popsán na obrázku 2.1.

Materiál modelu je na bázi fotopolymerů nebo pryskyřice. Tato metoda vyžaduje stavbu podpor. Po ukončení tisku se prototypová součást vyjme z podpor, následuje úprava povrchu včetně opracování v UV komoře, kde součást získá požadovanou integritu povrchu, barvu.

Metoda SLA se převážně využívá v automobilovém průmyslu při výrobě modelů aut, na kterých se zkouší různé přípravky, nástroje [5].



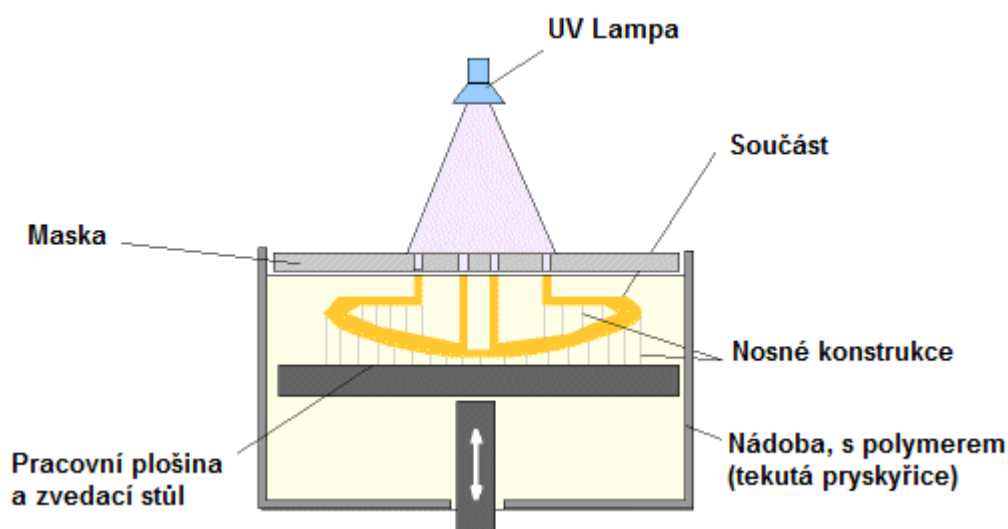
Obr. 2.1. Princip metody SLA[6]

## 2.2 SGC – SOLID GROUND CUTTING

Po zpracování dat projde šablonová deska ionografickým procesem nanášení speciálního toneru. Na nosnou desku je nanášena tenká vrstva fotopolymerní pryskyřice, nad kterou je umístěna šablonová deska. Krátkodobým působením UV lampy je pryskyřice vytvrzena. Po odstranění šablony je nevytvrzená pryskyřice vakuově odsáta. Na místa, ze kterých byla odsáta nevytvrzená pryskyřice, se nanese na roztavený výplňový vosk, který slouží jako podpora pro další vrstvu. Metoda je zobrazena na obrázku 2.2.

Materiál modelů je na bázi fotopolymerů nebo pryskyřice, vyžaduje stavbu podpor, které se odstraňují chemicky. Dokončená součást je v některých případech ještě závěrečně vytvrzována pomocí ozařování speciální UV lampou. Po konečném vytvrzení je nutné ze součásti odstranit podpory a přebytečný materiál ve formě vosku.

Hlavní oblast použití této metody je v ověřování designu, funkce a složení strojních součástí, dále pro účely prezentace nových výrobků. Další použití je v medicíně pro výrobu chirurgických pomůcek, výrobu zakázkových protéz. Součásti vyrobené touto metodou lze použít pro tzv. lití na ztracený vosk, lití do písku a do sádry [5].



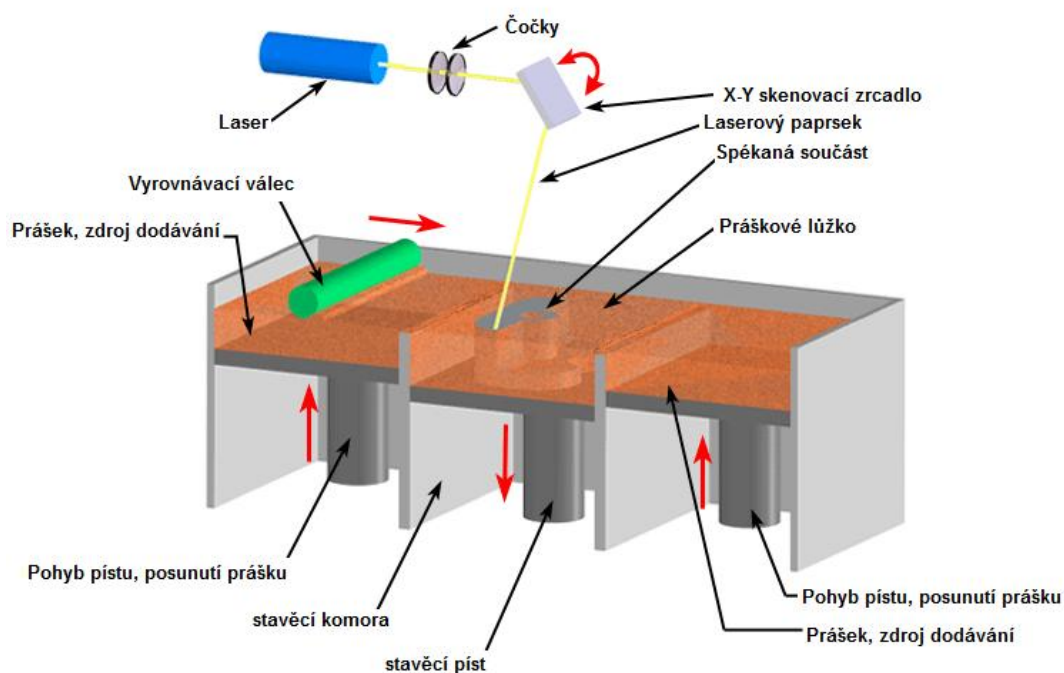
Obr. 2.2. Princip metody SGC [7]

### 2.3 SLS – SELECTIVE LASER SINTERING

Princip metody je vyobrazen na obrázku 2.3. Na podkladovou desku je nanесena první vrstva práškového materiálu. Prášek je působením CO<sub>2</sub> laseru nataven tak, že dochází k jeho spékání pouze v požadovaném místě. Okolní materiál zůstává nespečen a slouží jako podpora. Tímto způsobem je dokončena jedna vrstva. Nosná deska je posunuta o tloušťku jedné vrstvy dolů a další vrstva prášku je nanесena speciálním válečkovým mechanismem. Tento proces spékání se opakuje do vzniku prototypu.

Materiálem prototypových součástí je prášek ve formě: kovu, plastu, pryže, keramiky a speciálního písku. Materiál je ve formě velmi jemného prášku (částice 20 až 100 μm). Metoda vyžaduje stavbu podpor, které jsou tvořeny nespečeným práškem v okolí modelu.

Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu, slouží k odstranění podpor, tryskání, obrábění jako klasický materiál, broušení, leštění. Metoda SLS získává široké pole uplatnění v oblasti výroby forem a nástrojů pro výrobu plastových, keramických nebo kovových výrobků ať už jako prototypové formy, malosériové formy, tvarově složité vložky, jádra s chladicími kanálky optimalizovanými dle tvaru a složitosti dutiny pro rychlejší odvod tepla [5].



Obr. 2.3. Princip metody SLS [8]

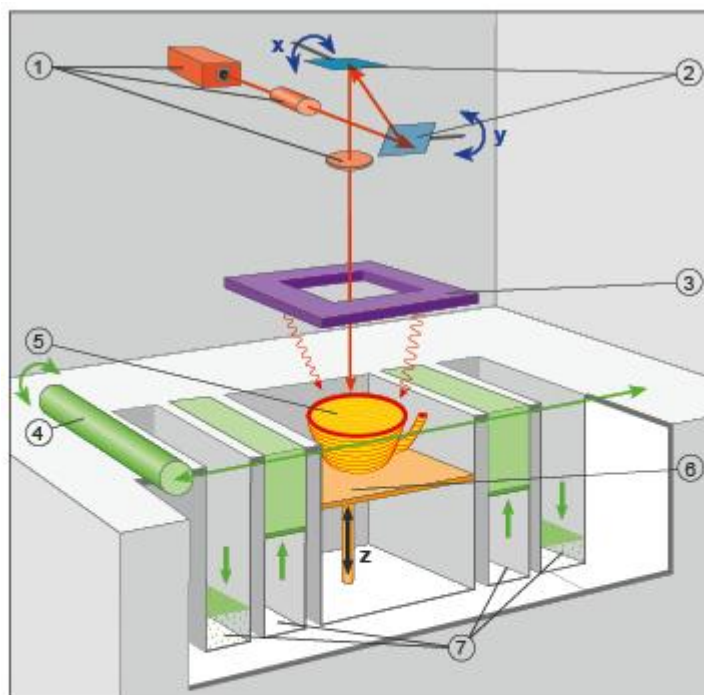
## 2.4 DMLS – DIRECT METAL LASER SINTERING

Dávkovací zařízení nastaví množství prášku pro jednu vrstvu a rameno s keramickým břítem rozprostře na povrch ocelové platformy rovnoměrnou vrstvu prášku dle zvolené tloušťky vrstvy. V místě dopadu laserového paprsku je kovový prášek lokálně roztaven, přičemž dochází k protavení podkladové vrstvy, která následně tuhne do pevného stavu. Ocelová platforma odvádí zároveň teplo, takže roztavený kov tuhne velmi rychle. Pro většinu materiálů je pracovní komora vyplněna dusíkem a díl je tak chráněn před oxidací. Metoda je vyobrazena na obrázku 2.4.

Materiálem prototypových součástí je prášek ve formě kovu a slitin. Materiál je ve formě velmi jemného prášku, tloušťka pokládané vrstvy (0,020 až 0,040  $\mu\text{m}$ ). Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu, odstranění podpor, tryskání, obrábění jako klasický materiál, broušení, leštění.

Metoda DMLS postupně získává pozici výrobní metody pro rychlou a zároveň přesnou výrobu plně funkčních prototypových dílů nebo finálních výrobků pro různé aplikace. Proces 3D tisku vytváří vysoce odolné, ale přitom jemné komponenty, které nachází využití v mnoha odvětvích, včetně leteckého, automobilového, elektronického nebo balicího průmyslu a medicíny [5].





1. Laserový poprsek - zdroj, systém čoček
2. Zrcátko pro X-Y pohyb paprsku
3. Ohřev komory (statický)
4. Otočný válec pro aplikaci prášku
5. Výlisek bez nosné konstrukce
6. Zvedací plošina
7. Přepad pro přebytečný materiál

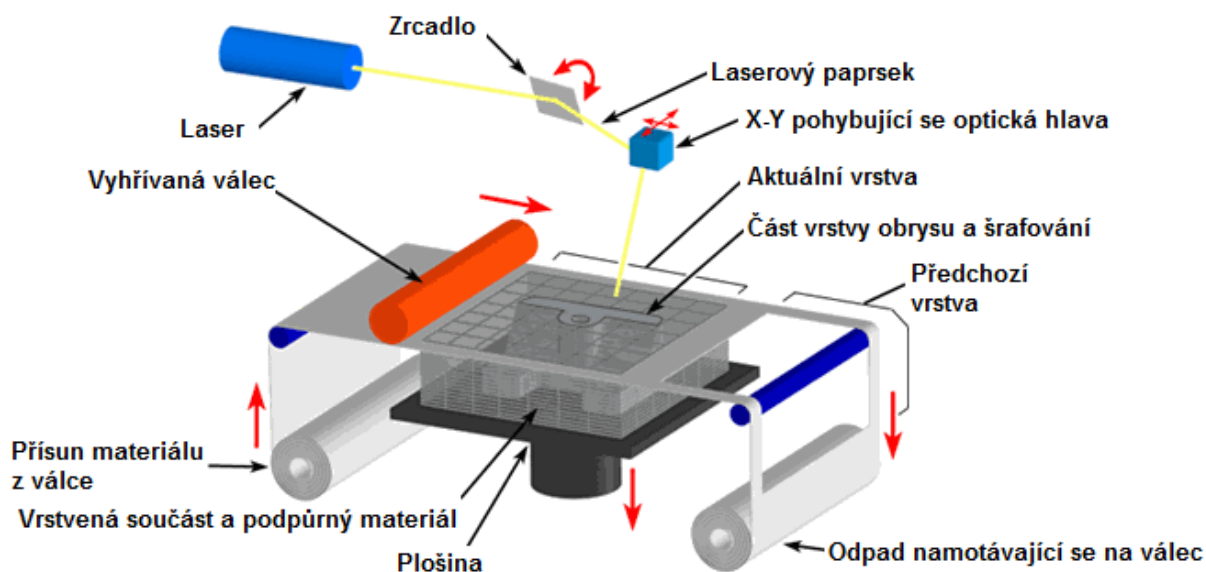
Obr. 2.4. Princip metody DMLS [9]

## 2.5 LOM – LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

Modely vyrobené touto metodou jsou tvořeny velkým množstvím fólií. Jednotlivé fólie jsou na jedné straně opatřeny příslavným nátěrem, kterým jsou přilepeny k předcházející vrstvě. Laserem je následně vyřezána kontura modelu. Materiálem modelů jsou fólie tvořené papírem, plasty (nylon, polyester) nebo keramikou. Přebytečný materiál je rozřezán na jednotlivé kvádry, které jsou na závěr procesu odstraněny. Schéma metody na obrázku 2.5.

Součásti lze dokončit běžnými obráběcími metodami jako je vrtání, frézování a soustružení. Povrch součásti je nutné pokrýt silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, aby součást nezvětšovala svoje rozměry vlivem vsakující se vlhkosti.

Součásti vzniklé touto metodou se používají pro účely vizualizace, marketingu a prezentaci nových výrobků potenciálním zákazníkům. Modely je také možné použít jako formy pro nejrůznější odlévací a vstřikovací technologie [5].

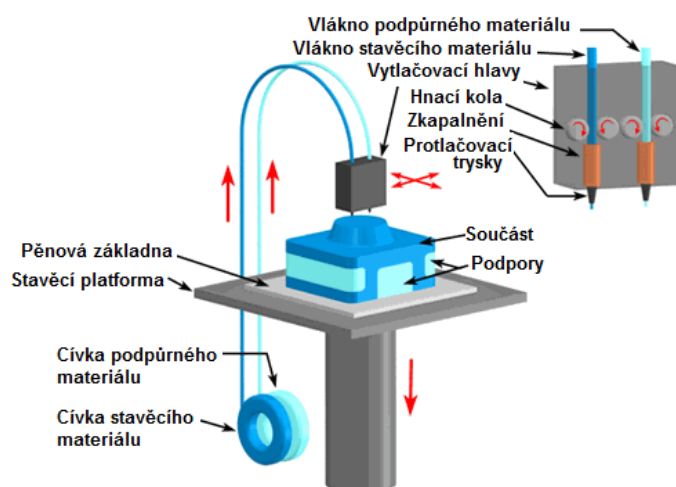


Obr. 2.5. Princip metody LOM [10]

## 2.6 FDM – FUSED DEPOSITION MODELLING

Princip metody spočívá v natavování termoplastického materiálu navinutého ve formě drátu na cívce, ze které je vtlačován do vyhřívání trysky pomocí kladek a následně nanášen po jednotlivých vrstvách na podložku. Součásti jsou vyráběny z ABS nebo ABS+ plastu, polykarbonátu, elastomeru, vosku. Tisková hlava se pohybuje v rovině X, Y dokud nedokončí celou jednu vrstvu součásti. Poté se celá tisková hlava posune o tloušťku vrstvy v ose Z směrem nahoru a dojde k vytisknutí další vrstvy. Metoda znázorněna na obrázku 2.6.

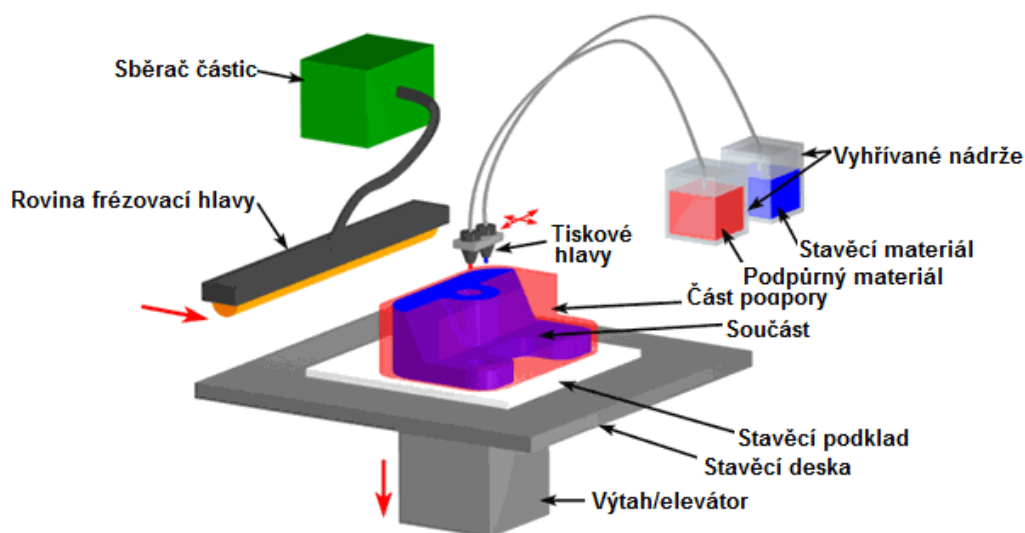
Prototypové součásti vyrobené touto metodou se používají při testování funkčnosti a designu nových případně inovovaných výrobků. Vzhledem k pevnosti používaných materiálů lze tyto modely vystavit zatížení, které odpovídá realitě [5].



Obr. 2.6. Princip metody FDM [11]

## 2.7 MJM – MULTI JET MODELLING

Postupné nanášení jednotlivých vrstev termo-polymeru pomocí speciální tiskové hlavy, skládá se z 352 trysek uspořádaných vedle sebe v délce 200 mm. Pracovní hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy X, Y – po nanesení jedné vrstvy se deska sníží o tuto tloušťku směrem dolů. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s již naneseným materiálem téměř okamžitě. Popis metody vyobrazen na obrázku 2.7 [5].



Obr. 2.7. Princip metody FDM [12]

## 2.8 VÝHODY A NEVÝHODY METOD RP

Uvedené metody pracují na jiném principu, a proto tomu mají své výhody a nevýhody, které jsou popsány v tabulce č.1.

Tabulka 1. Výhoda a nevýhody metod RP [5]

Metoda Rapid Prototyping	Výhody	Nevýhody
SLA	Zhotovení objemnějších modelů, dostatečná přesnost, jakost povrchu. Široký výběr materiálů, není třeba obsluhy během procesu.	Metoda požaduje úpravu povrchu modelu a následné sušení.
SGC	Minimální smrštění modelu, dobrá struktura a stabilita modelu.	Velké rozměry zařízení, problémy s usazeninami vosku, tvorba odpadu, hlučnost zařízení.
SLS	Pevnost, velké množství použitelných materiálů, není potřeba podpor.	Prostorově a energeticky náročná zařízení, Kvalita povrchu závisí na velikosti zrn prášku – tedy nízká.

DMLS	Vysoká pevnost, není potřeba podpor.	Prostorově a energeticky náročná zařízení, kvalita povrchu nízká.
LOM	Možnost použití kteréhokoliv materiálu ve formě fólie, dále pak plasty, kovy, keramika, kompozitní materiály. Rychlost zařízení, není potřeba podpor.	Není vhodná pro modely s tenkou stěnou, pevnost modelu je omezena v použitém pojivu mezi jednotlivými vrstvami.
FDM	Výroba funkčních prototypů, vzniká minimální odpad, pouze materiál podpor.	Omezená přesnost – daná tvarem a průměrem výstupní trysky, zdlouhavá výroba – proces nelze urychlit z principu metody a vlastností materiálu.
MJM	Jednoduché řešení, ekonomická výhoda modelu, čas procesu.	Výroba menších součástí, omezená volba materiálu, menší přesnost.

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

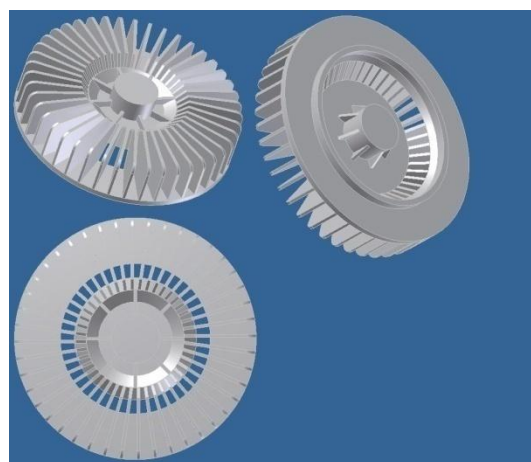
Vyráběný díl pomocí metody FDM byla poškozená součást chlazení elektromotoru pro motorovou pilu. Jednalo se o poškozený kus ventilátoru chlazení, který bylo nutno nejprve domodelovat do originální podoby. K tomuto účelu posloužil program Inventor.

#### 3.1 VÝROBA MODELU

Prvním krokem bylo změření poškozené součástky. K měření posloužilo posuvné měřítko (obr. 3.1). Na dané součásti chyběla poměrná část žebér, proto bylo nezbytné dopočítat všechna potřebná žebra. Daná součást byla rozdělena pod úhlem  $90^\circ$  a spočtena žebra v tomto kvadrantu. V programu se poté využila funkce kruhové pole. Tato funkce umožnila doplnit chybějící část dané součásti (obr. 3.2). Otvor, kterým je chlazení přidělané na hřídel se bude vyvrtávat až po odlití.



Obr. 3.1. Posuvné měřítko, poškozená část



Obr. 3.2. 3D model

#### 3.2 PŘEVOD 3D MODELU DO FORMÁTU PRO 3D TISKÁRNU

Téměř každý modelovací program umožňuje import do souboru \*.stl, což je formát vyžadovaný programem dodávaným k 3D tiskárně.



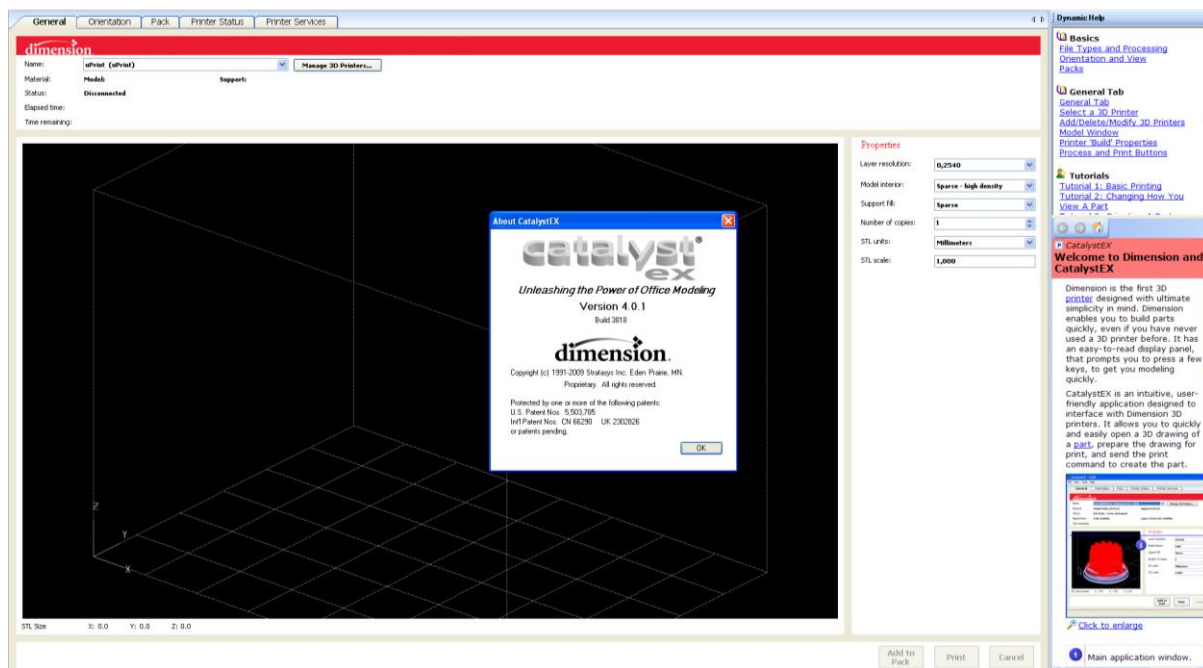
Obr. 3.3. Převod do stl formátu [13]



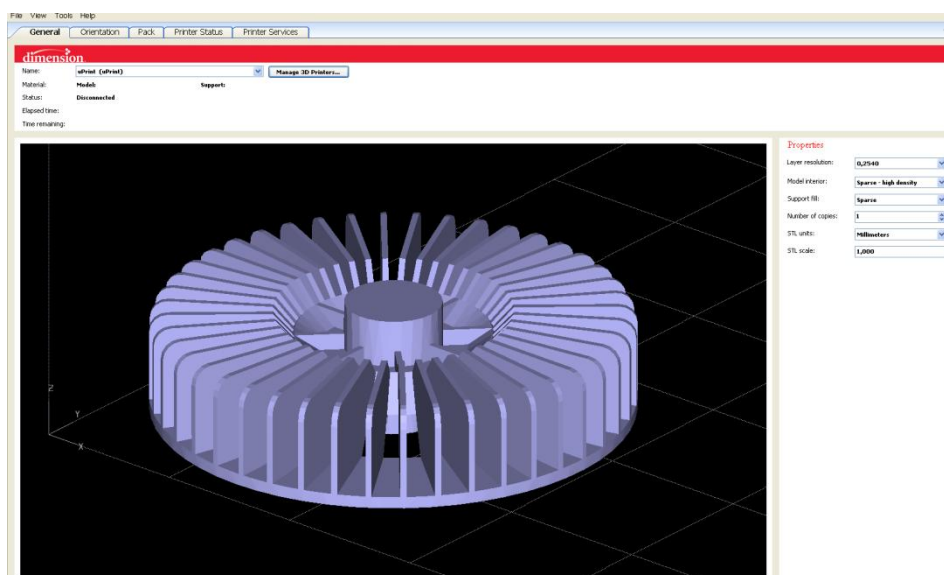
Povrch objektu je rozdělen do logické série trojúhelníků (obr. 3.3) každý trojúhelník je jednoznačně definován svými normálami a třemi body představující své vrcholy [13].

### 3.3 NAČTENÍ PROGRAMU CATALYSTEX

K úspěšnému vytištění modelu na tiskárně uPrint je důležité mít potřebný software, který je dodávám k tiskárně. Název programu je CatalystEX (Obr. 3.4). V tomto programu se nastaví všechny potřebné údaje, tloušťka vrstvy, vyplnění vnitřního objemu stěn. Při vhodném nastavení se dá ušetřit potřebný čas tisku, někdy i finance na vytištění modelu.



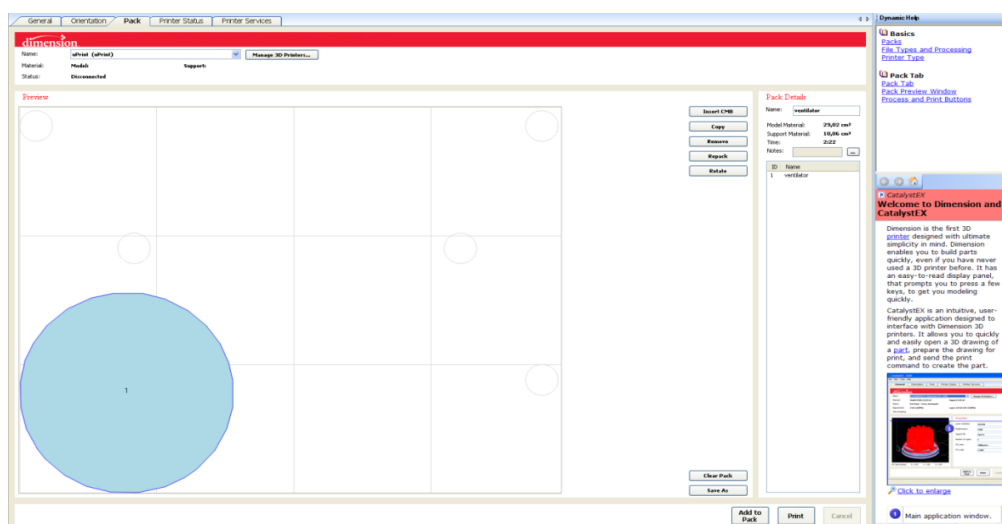
Obr. 3.4. Program CatalystEX



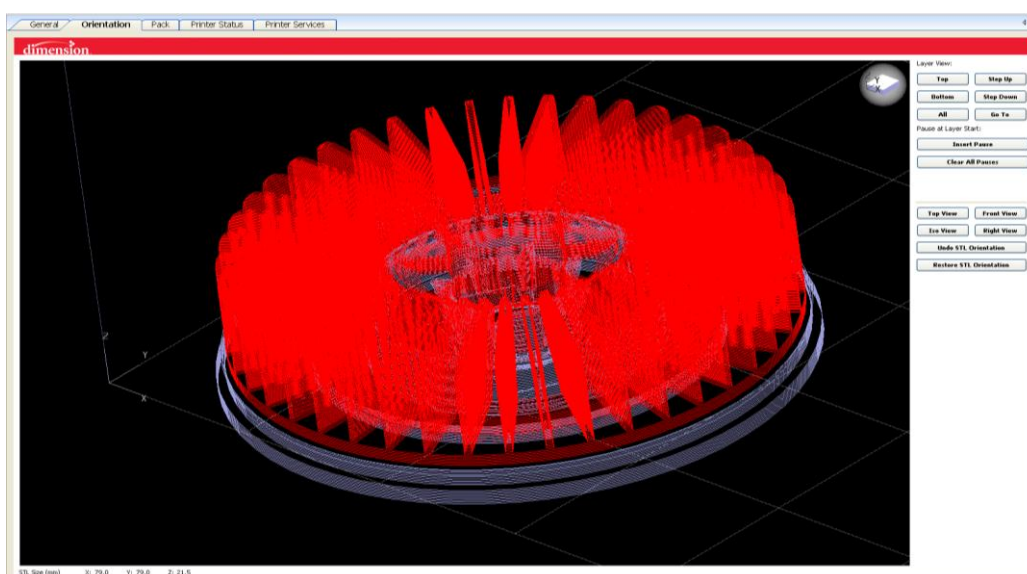
Obr. 3.5. Načtení 3D modelu ventilátoru

Na obrázku 3.5 je vidět úspěšné načtení 3D modelu ventilátoru. V pravém menu programu byly nastavené potřebné hodnoty k úspěšnému vytištění modelu. První položka layer resolution (tloušťka vrstvy) byla nastavena hodnota 0,254 mm, s touto vrstvou pracuje 3D tiskárna uPrint. Jako další se nastavuje model interior (kvalita modelu), byla vybrána hodnota sparse – high density (řidké – vysoká hustota). Support fill (Podpora vyplnění) je hodnota sparse (řidké) – typ podpor, na výběr Basic, Sparse, Minimal, Break-away, Surround (základní, řidké, minimální, odtrhnutý, prostorový). Každý typ podpory slouží pro daný druh vyráběných součástí, při výrobě spotřebních součástí se ve většině případů používá podpora sparse. Další hodnoty měřítko, nastavena hodnota 1, model bude vytištěn v měřítku 1:1.

K úspěšnému zahájení tisku se musí vybrat umístění 3D modelu, dále se posoudí, jestli se bude tisknout s podporami. Podpora slouží k udržení jednotlivých vrstev modelu, aby se nám nezhroutily jednotlivé vrstvy a model se nedeformoval. Umístění modelu na podložce (obr. 3.6), následuje model s podporami (obr. 3.7).



Obr. 3.6. Umístění 3D modelu



Obr. 3.7. Zobrazení modelu s podporami

Program nám vypočte celkový objem master modelu, cena master modelu se počítá od  $\text{cm}^2$ , takže nás zajímá celkový objem a víme cenu master modelu. Jako další krok programu se odešlou data na tiskárnu, kde se začne tisknout model.

### 3.4 TISK 3D MODELU

Před odesláním dat na tiskárnu uPrint, bylo zapotřebí tiskárnu připravit na provozní teplotu, což vyžadovalo zapnutí tiskárny uPrint o 15 minut dříve. Poté byla odeslána data, tisk modelu se spustil automaticky, na displeji se nám zobrazí doba tisku, ventilátor se tisknul necelé 2 hodiny. Na obrázku č. 3.8 je vidět vytištěný model na podložce, z této podložky je master model odstraněn odtrhnutím. Poté se podložka očistí, aby mohla sloužit pro další tisk. Hnědá barva na ventilátoru značí podpory, ty se musí odstranit v ultrazvukové lázni, protože ventilátor je komplikovaný, tak má podpory i vevnitř.



Obr. 3.8 Dokončení 3D tisku

Model v ultrazvukové lázni byl téměř 48 hodin, aby bylo dosaženo dokonalého odstranění podpor. Nyní již ventilátor odpovídá 3D modelu (Obr. 3.9).



Obr. 4.1. Odstranění podpor

### 3.5 PŘÍPRAVA MASTER MODELU PRO TVORBU FORMY

Z předešlého obrázku na očištěném master modelu je značná pórovitost, tato vlastnost by způsobovala problémy během tvorby formy, forma by neměla celistvý povrch a odlitek též. Vytisknutý master model se musí upravit. Tato úprava spočívá v nástřiku plniče - tmelu. Plnič se používá pro úpravu laku karosérií, kde před finálním lakem zakryje případné nerovnosti. Master model byl stříknut plničem od firmy Motip, nyní má master model barvu pískovou, až hnědou. Po zaschnutí se musí master model vybrousit pod vodou. Postup opakujeme do té doby, než je povrch master modelu hladký, bez vad na povrchu. Vadami se rozumí póry, nečistoty, chybějící kusy. Postup přípravy master modelu na obrázku 4.2.

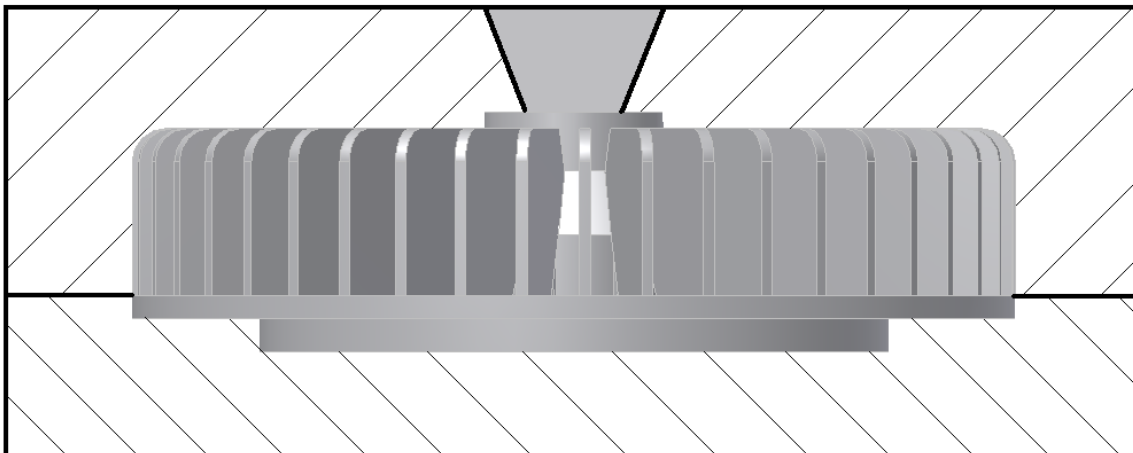


Obr. 4.2 Příprava master modelu

### 3.6 VÝROBA SILIKONOVÉ FORMY

Forma bude vyrobena ze silikonu pomocí master modelu. Nejdříve se vyrobí horní část formy a následně spodní část. Vtoková soustava bude na horní části formy. Teoretický tvar formy s vtokovou soustavou zobrazen na obr. č. 4.3.



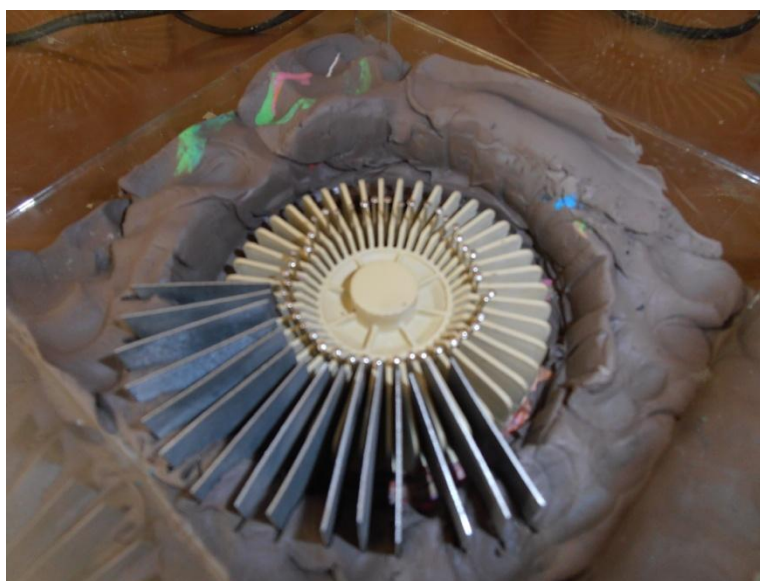


Obr. 4.2. Forma

### 3.6.1 VÝROBA HORNÍ ČÁST FORMY

K výrobě vrchní formy bude třeba skleněná podložka, dále 4 ks skleněných tabulí a na spojení tavná pistole. Tavná pistole použita ke spojení skel a také proto, aby zabránila tekutému silikonu vytékat ven. Sklo ohraničí tvar formy, tedy čtverec, který je možné oříznout na kruh, či jiný tvar.

Nejdříve bude použita modelovací hmota, aby se s modelovací hmotou dalo lépe pracovat, je potřebné ji alespoň po dobu deseti minut ohřát na teplotu 75°C. Pomocí hmoty se zaplnily otvory, které přivádí vzduch na elektromotor. Pro větší pevnost formy a zabránění deformaci žeber na odlitku, bude mezi každé žebro vsazen ocelový plíšek. Kolem stěn skla se vytvoří pomocí modelovací hmoty kruhový tvar, a následně se do něho vsadí ocelové plíšky. Postup vsazování plíšků zobrazen na obrázku 4.5. Na obrázku jsou patrné špendlíky, které umožní spojení se spodní formou.



Obr. 4.5. Vsazování plíšků

Nyní je všechno připravené pro odlití horní části silikonové formy. K tomu účelu poslouží dvojsložková vysokopevnostní hmota (silikon Silastic T-4 a vytvrzovací složka Silastic T-4 Curing Agent). Poměr udávaný pro zhotovení průsvitné silikonové formy činí 10:1. Pro horní část formy postačí cca 250 g silikonu a cca 25 g tužidla. Suroviny je zapotřebí důkladně promíchat, aby se spojily. Promíchaná hmota má patrné bubliny, tyto bubliny odstraní vakuování. Pro vakuování bude použita vakuová komora MK Mini (obr. 4.6). Vakuování se provádí přibližně tři krát po sobě po dobu třiceti minut. Následuje zalití do připravené skleněné formy. Tuhnutí bude trvat po dobu dvanácti hodin, jak uvádí výrobce silikonu. Před nalitím hmoty byl vymodelován z modelovací hmoty lící otvor, který byl vložen na master model a zalit silikonem (Obr. č. 4.7).



Obr. 4.6 MK Mini



Obr. 4.7. Zalitá forma

Druhý den byla forma rozebraná a očištěna od modelovací hmoty. Následovalo vyjmutí master modelu, ten však nešel z formy vyjmout. Při následném opětovném zkoumání formy

bylo zjištěno, že silikon protekl i tam, kam neměl. Modelovací hmota špatně utěsnila otvory pro chlazení, takže se forma musela rozřezat, aby se dal vyjmout nepoškozený master model. Po vyjmutí master modelu bylo zapotřebí vytvořit horní část formy znovu, ale dát si větší pozor na správné umístění modelovací hmoty (obráz. 4.8). Znovu se vytvořila silikonová hmota, která se nalila do skleněné formy a nechala se ztuhnout.

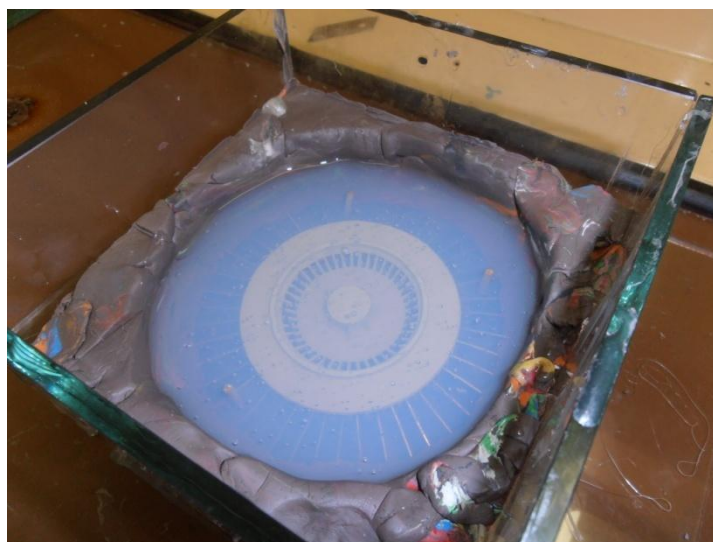


Obr. 4.8. Výroba horní části silikonové formy

Druhý den se rozebrala skleněná forma, silikonová forma se očistila od modelovací hmoty. Následovalo vyjmutí master modelu.

### 3.6.2 VÝROBA SPODNÍ ČÁSTI FORMY

Spodní část formy se vyráběla podobně jako vrchní. Rozdíl spočívá v tom, že bylo zapotřebí sestavit skleněné hrazení, do kterého byla vsazena horní část formy i s master modelem. Kolem skleněného hrazení se pomocí modelovací hmoty vytvořil požadovaný tvar formy. Aby se tekutý silikon nepřilepil k již vytvořené formě a master modelu, tak tyto části byly potřeny speciálním přípravkem (Obr. 4.9).



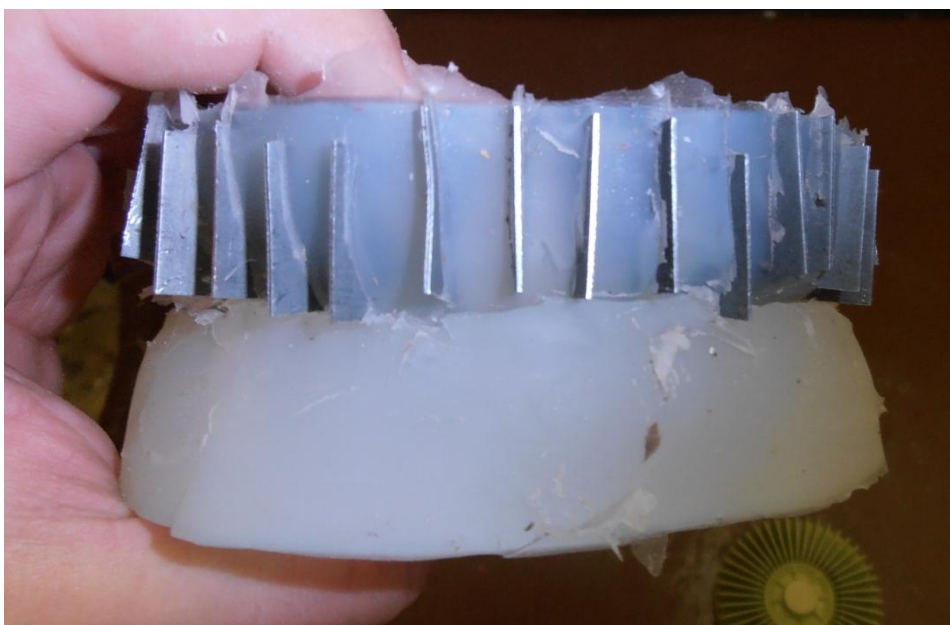
Obr. 4.9. Zalitá spodní část formy



Po uplynutí dvanácti hodin a zatuhnutí silikonu se skleněná forma rozebrala, očistila od modelovací hmoty a zkusila se rozebrat silikonová forma. Master model se podařilo vyjmout, aniž by se forma zničila. Nyní je forma hotová a připravená k odlití ventilátoru.

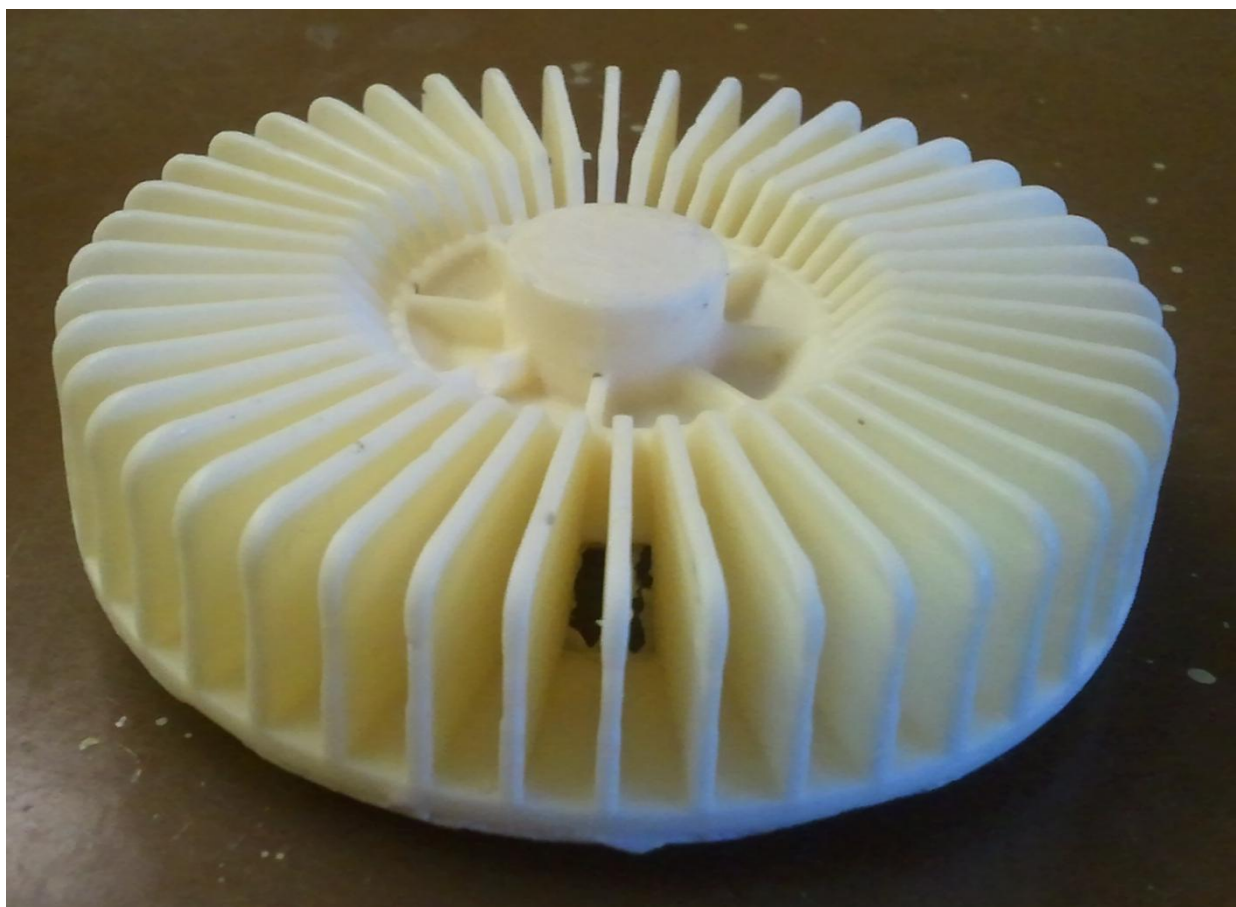
### 3.7 ODLITÍ VENTILÁTORU

Aby mohl být ventilátor odlit, bylo zapotřebí spojit formy k sobě. Spodní i horní polovina formy se k sobě pevně spojí, k tomuto účelu poslouží sešíváčka (obr. 5.1). Forma se musí spojit pevně, aby odlitek neměl jiný tvar, než je požadován. V jiném případě by mohla hmota protéct a ve formě by vznikl zdeformovaný odlitek.



Obr. 5.1. Spojená forma

Hmota, kterou bude forma plněná vysoce-pevnostní polyuretanová licí pryskyřice. Obchodní název Ebalta SG 2000, je odolný proti mechanickému poškození. Výrobce uvádí mísící poměr s tužidlem 1:1 a dobu promíchání kolem dvou až tří minut pro množství 50 gramů při pokojové teplotě 20°C. Během této doby se obě složky musí spojit, takto připravená hmota se nalije do sešité formy a nechá se ztuhnout. Doba tuhnutí se pohybuje okolo 0,5 až 1 hodiny. Odlitý ventilátor se vyjme z formy a následně se musí upravit. Úprava spočívá v ořezání licí hmoty (obr. 5.2), dále vyvrtání otvoru [14].



Obr. 5.2. Odlitý, ořezaný ventilátor

## 4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Z důvodu poškozeného dílu chlazení nemůže být elektromotor pod stálou zátěží, mohlo by dojít k přehřátí a následnému zničení. Ventilátor chlazení se nedá zakoupit jako náhradní díl. Nabízí se možnost řešení buď zakoupit jiný elektromotor, nebo vyrobit ventilátor. Byla zvolena výroba ventilátoru metodou FDM a následné vytvoření formy pro odlitek. Silikonová forma zaručuje přesnost pro pět kusů odlitků, jelikož nezáleží na rozměrech v desetinách milimetrů, tak forma vydrží i 20ks. Otvor pro nasazení na čep elektromotoru se bude vyvrtávat až po odlití.

Cena vytisknutého master modelu byla 650Kč, silikon 0,70 Kč/gram a vysoko-pevnostní pryskyřice stojí 1,50 Kč/gram. Po dohodě s vedoucím práce bude srovnána výroba za pomoci metody FDM s odlitím vysoce-pevnostní pryskyřice v počtu deseti kusů. Srovnání v tabulce č. 2.

Tabulka 2. Výrobní náklady:

Výrobní náklady			Cena při výrobě 10 ks[Kč]:	Cena při výrobě 1 ks [Kč]:
Metoda				
FDM	Vytvoření Master modelu [Kč]:		6500	650
	650			
Odlití	Výroba formy [Kč]:	Odlitek vysoce-pevnostní pryskyřice:	1951	1141
	401	90		

Z tabulky je zřejmé, že výroba odlitím ventilátoru do silikonové formy je levnější oproti metodě FDM při výrobě deseti kusů. Do této ceny nejsou zahrnuty režijní náklady, spotřeba elektrické energie, tvorba 3D modelu. Cena master modelu je cena za materiál, protože bylo tisknuto na tiskárně VUT.

### Výpočtové vztahy:

Cena 10 ks Master modelu:

$$x = V_M \cdot p \text{ [Kč]}$$

Kde: x ... výsledná cena 10 ks,

p... počet kusů,

$V_M$ ... výroba Master modelu.

Cena při výrobě odléváním:

$$y = (V_O \cdot p) + V_F + V_M \text{ [Kč]}$$

Kde: y ... výsledná cena 10 ks,

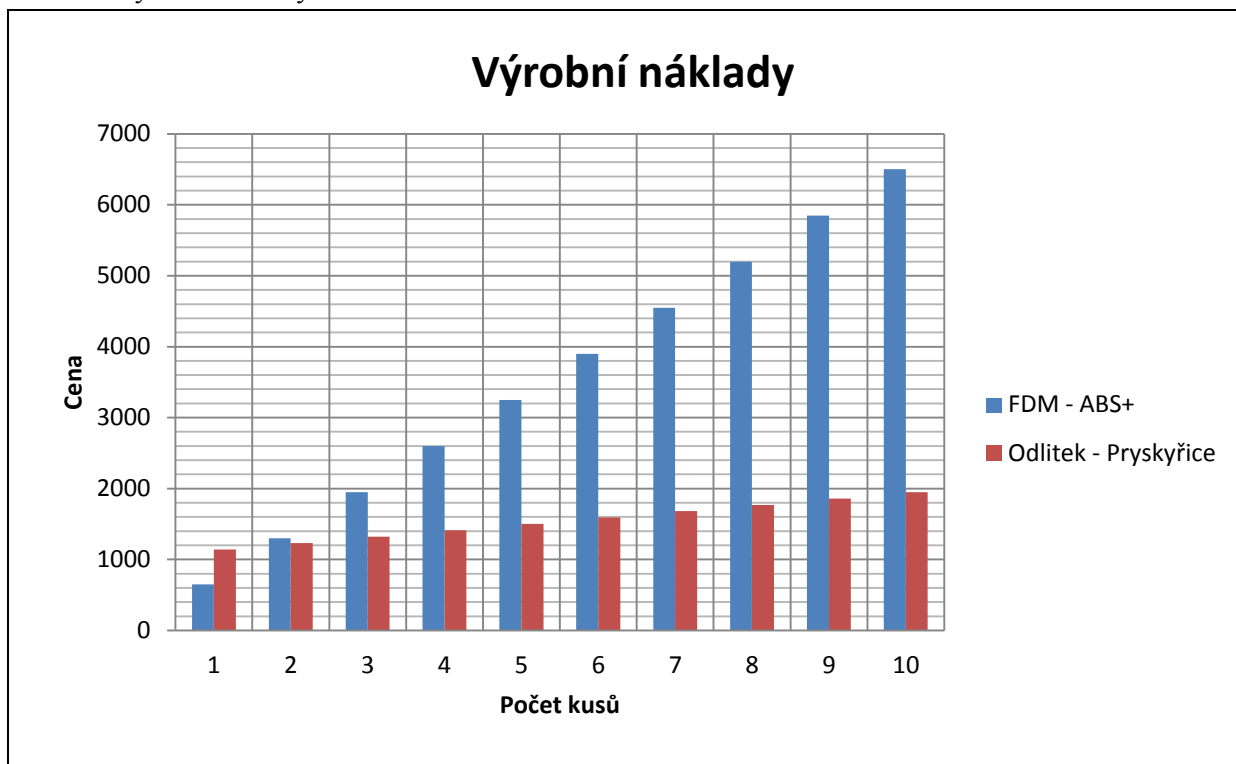
p... počet kusů,

$V_O$ ... výroba odlitku,

$V_F$ ... výroba formy.

Graf 1 zobrazuje výrobní náklady v závislosti na počtu vyrobených kusů a zvolené výrobní metodě.

Graf 1. Výrobní náklady



## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá výrobou náhradního dílu, který nelze zakoupit. Vycházelo se z poškozeného dílu ventilátoru chlazení elektromotoru. V první části práce byly popsány všechny dostupné metody Rapid Prototyping s jejich výhodami a nevýhodami. Náhradní díl vyráběný v této práci byl metodou FDM.

Vlastní část práce se zaměřuje na zhotovení master modelu, nejdříve bylo nutné danou součást vymodelovat za pomoci softwaru Autodesk Inventor, a poté byl 3D model převeden do formátu \*.stl, který je potřebný pro software k tiskárně uPrint. Načtený formát \*.stl v programu CatalystEX byl odeslán na 3D tiskárnu, kde byl vytištěn master model, který měl kolem sebe podpory. Podpory byly odstraněny chemicky v ultrazvukové čističce.

Následně byl master model upraven pro zhotovení silikonové formy, jeho povrch byl značně pórovitý, drsný. Povrch byl zatmelen, poté pod vodou broušen. Broušení probíhalo do té doby, než byl povrch master modelu celistvý, hladký. Po úpravě master modelu byla zhotovena horní část silikonové formy, následovalo zhotovení spodní části formy. Poté byly obě poloviny spojeny k sobě. Do formy byla odlita vysoce-pevnostní pryskyřice.

Závěrečná část práce zahrnuje zhodnocení ekonomického hlediska, které hodnotí výrobu ventilátoru pomocí metody FDM a vysoce-pevnostní pryskyřice při zhotovení deseti kusů.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Historie CAD systémů [online]. [vid. 2013-04-09]. CAD FEM – portal. Dostupné z World Wide Web: <http://cad-fem.zcu.cz/cad?showall=&start=1>.
2. CAD – Computer Aided Design [online]. [vid. 2013-04-09]. CAD FEM - portál. Dostupné z World Wide Web: <http://cad-fem.zcu.cz/cad?showall=&limitstart=>.
3. AutoPara for AutoCAD 1.0 [online]. [vid. 2013-04-09]. View larger. Dostupné z World Wide Web: <http://www.brothersoft.com/autopara-for-autocad-48760.html>.
4. Systémy CAD [online]. [vid. 2012-05-17]. Systémy CAD. Dostupné z World Wide Web: [http://esf.fme.vutbr.cz/modul/3/systemy\\_cad.pdf](http://esf.fme.vutbr.cz/modul/3/systemy_cad.pdf).
4. Rapid prototyping online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.syscae.cz/rapid-prototyping/>.
5. Speciální technologie výroby – Aditivní technologie výroby Rapid prototyping [online]. [vid. 2013-03-10]. Dostupné z World Wide Web: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_techologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf).
6. Stereolitografie [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main05.html>.
7. Solid Ground Curling (SGC) [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/html/sgc/eindex.html>.
8. Selective Laser Sintering [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/main06.html>.
9. [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.vg-kunst.de/en/information/dictionary/dictionary.html>.
10. Lexicon - Stereolithography SL [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>.
11. Fused Deposition Modeling (FDM) [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>.
12. Printing Technologies [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://kylestetzerp.wordpress.com/category/printing-technologies/>.
13. Tech Tips [online]. [vid. 2013-03-12]. Dostupné z World Wide Web: <http://bastech.com/sla/techtips/STLfiles.asp>.
14. Ebalta [online]. [cit. 2012-03-25]. Ebalta . Dostupné z World Wide Web: <http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/rychleschnouci-lici-pryskyrice/pryskyrice-neobsahujici-plniva/sg-2000-komp-a%C2%A0-b>.

